

Optimasi Model Linier 6-DOF pada Sistem Autonomous Underwater Vehicle

Teguh Herlambang¹⁾, Hendro Nurhadi²⁾, Eko Budi Djatmiko³⁾

¹⁾Program Studi Sistem Informasi Universitas Nahdlatul Ulama Surabaya (UNUSA)

²⁾Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

³⁾ Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

teguh@unusa.ac.id¹⁾, hdnurhadi@me.its.ac.id²⁾, ebdjtmiko@oe.its.ac.id³⁾

Abstrak

Pada paper ini dilakukan optimasi dari sistem UNUSAITS AUV melalui linierisasi model nonlinier dengan matriks Jacobi. Selanjutnya hasil linierisasi dianalisa terkait sifat keterkontrolan dan keteramatan tanpa sistem kendali. Model linier dalam 6 derajat kebebasan (DOF) yang terdiri dari 2 gerakan yaitu gerak translasi dan rotasi, di mana gerak translasi terdiri dari gerak surge, sway dan heave, sedangkan gerak rotasi terdiri dari gerak roll, pitch dan yaw. Hasil optimasi terhadap model linier pada sistem UNUSAITS AUV menunjukkan bahwa sistem terkontrol dan teramat sehingga model linier pada sistem UNUSAITS AUV dapat diterapkan sistem navigasi, panduan dan kendali. Pada penerapan model linier AUV dengan sistem kendali PID menghasilkan error 0.4% - 17.3%.

Kata Kunci: AUV, model linier, matriks Jacobi, keterkontrolan, keteramatan

1. PENDAHULUAN

Autonomous Underwater Vehicle (AUV) atau secara umum disebut kapal selam tanpa awak adalah salah satu jenis robot bawah air yang telah menarik minat banyak penelitian beberapa tahun terakhir. AUV adalah kendaraan yang dapat bergerak dalam enam derajat kebebasan serta melaju di dalam air menggunakan sistem propulsi, dikendalikan dan dikemudikan oleh operator dengan bantuan komputer di atas kapal pendukung berdasarkan sistem navigasi, panduan dan kendali (Herlambang, 2015b).

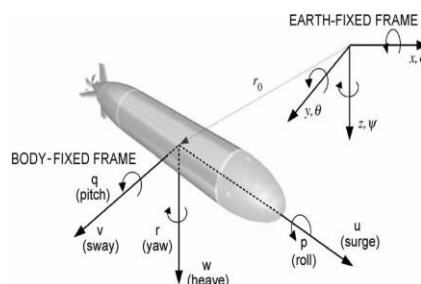
Beberapa perkembangan teknologi AUV, area aplikasinya telah meluas secara bertahap, meliputi bidang-bidang berikut:

- Ilmu Pengetahuan: pemetaan dasar laut, sampel geologi, pemantau oseanografi
- Lingkungan: inspeksi struktur bawah air, termasuk pipa, bendungan, dll; pemantauan jangka panjang sebagai misal radiasi dan kebocoran, survei laut dan penilaian sumber daya.
- Militer: peralatan sistem pertahanan bawah laut

Memperhatikan kegunaan dan manfaat dari AUV di atas, maka Indonesia sangat perlu mengembangkan AUV, karena lebih dari 70% dari wilayah Indonesia adalah lautan, sehingga AUV merupakan teknologi yang baik untuk menjaga potensi laut Indonesia. AUV sangat diperlukan untuk membantu survei eksplorasi bawah laut Indonesia (Herlambang dkk, 2015a), karena AUV relatif flexibel untuk eksplorasi lautan tanpa menggunakan kabel.

Pada paper ini diawali dengan penyusunan model matematika dari AUV, di mana model ideal yang biasa digunakan adalah model non-linier 6-DOF. Pengembangan model 6-DOF sebenarnya masih jarang dilakukan, dikarenakan kompleksitasnya maka pada paper ini dilakukan pengembangan model linear yang dihasilkan melalui linearisasi model non-linier 6-DOF dengan matriks Jacobi. Selanjutnya diuji karakteristik dari model linier AUV dengan keterkontrolan dan keteramatan serta penerapan sistem kendali PID.

2. AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE (AUV) MODEL



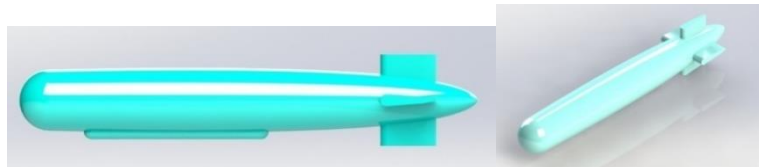
Gambar 1. Enam derajat kebebasan gerak AUV (Yang, 2007)

Pada awalnya ada dua hal penting yang dibutuhkan untuk menganalisa AUV, yaitu sistem sumbu yang terdiri dari Earth Fixed Frame (EFF) dan Body Fixed Frame (BFF) seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (Yang, 2007). EFF digunakan untuk menjelaskan posisi dan orientasi dari AUV, di mana posisi sumbu-x mengarah ke arah utara, sumbu-y ke arah timur dan sumbu-z ke arah pusat bumi. Sedangkan BFF mendefinisikan sumbu-x positif mengarah ke haluan wahana, sumbu-y positif mengarah ke sisi kanan wahana, dan sumbu-z positif mengarah ke bawah (Fosen, 2005). Sistem BFF digunakan untuk menjelaskan kecepatan dan percepatan dari AUV dengan titik mula berada pada pusat gravitasi. Profil dan spesifikasi UNUSAITS AUV terdapat pada Gambar 2 dan Tabel 2. Gambar 1 dan Tabel 1 menunjukkan bahwa AUV mempunyai enam derajat kebebasan (6-DOF) yang terdiri dari surge, sway, heave, roll, pitch dan yaw. Persamaan gerak AUV dipengaruhi oleh gaya luar sebagai berikut:

$$\tau = \tau_{hidrostatik} + \tau_{addedmass} + \tau_{drag} + \tau_{lift} + \tau_{control} \quad (1)$$

Tabel 1. Derajat kebebasan AUV (Yang, 2007)

DOF	KETE-RANGAN	GAYA / MOMEN	KEC LINIER/ ANGULAR	POSISI/ SUDUT EULER
1	Surge	X	u	x
2	Sway	Y	v	y
3	Heave	Z	w	z
4	Roll	K	p	ϕ
5	Pitch	M	q	θ
6	Yaw	N	r	ψ

**Gambar 2.** Profil UNUSAITS AUV**Tabel 2.** Spesifikasi dari UNUSAITS AUV

Berat	16 Kg
Panjang	1500 mm
Diameter	200 mm
Controller	Ardupilot Mega 2.0
Komunikasi	Wireless Xbee 2.4 GHz
Camera	TTL Camera
Battery	Li-Pro 11,8 V
Propulsion	12V motor DC
Propeller	3 Blades OD : 50 mm
Speed	3.1 knots (1.5m/s)
Kedalaman Maksimum	8 m

Pergerakan dari AUV memiliki 6 derajat kebebasan (6 DOF) di mana terdiri dari 3 (tiga) derajat kebebasan untuk arah gerak translasi pada sumbu-x, y, dan -z dan 3 (tiga) derajat kebebasan yang lain untuk gerak rotasi terhadap sumbu-x, y, dan -z. Deskripsi umum AUV pada 6 DOF dapat dinyatakan dalam persamaan: (Fosen, 2005):

$$\begin{aligned} \eta &= [\eta_1^T, \eta_2^T]^T, \quad \eta_1 = [x, y, z]^T, \quad \eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T; \\ v &= [v_1^T, v_2^T]^T, \quad v_1 = [u, v, w]^T, \quad v_2 = [p, q, r]^T; \\ \tau &= [\tau_1^T, \tau_2^T]^T, \quad \tau_1 = [X, Y, Z]^T, \quad \tau_2 = [K, M, N]^T; \end{aligned} \quad (2)$$

di mana η menunjukkan vector posisi dan orientasi pada EFF, dengan η_1 yang menyatakan posisi pergerakan translasi dan η_2 sebagai posisi pergerakan rotasi. Notasi v menunjukkan vektor kecepatan linier dan anguler pada BFF, dengan v_1 mendeskripsikan vektor kecepatan linier dan v_2 vektor kecepatan anguler. Sedangkan τ menyatakan vektor gaya dan momen yang bekerja pada AUV pada BFF, dengan τ_1 sebagai vektor gaya dan τ_2 vektor sebagai momen.

Gaya dan momen total yang bekerja pada AUV dapat diperoleh dengan menggabungkan persamaan gaya hidrostatik, gaya hidrodinamik dan gaya dorong. Dalam hal ini diasumsikan tensor inersia diagonal (I_o) adalah nol, sehingga diperoleh gaya dan momen total dari keseluruhan model sebagai berikut:

Surge:

$$m[\ddot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X_{res} + X_{|u|u}|u| + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} \quad (3)$$

Sway :

$$m[\ddot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(pq + \dot{r})] = Y_{res} + Y_{|v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu\delta_r}u^2\delta_r \quad (4)$$

Heave :

$$m[\ddot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = Z_{res} + Z_{|w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uu\delta_s}u^2\delta_s \quad (5)$$

Roll:

$$I_x\ddot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K_{res} + K_{p|p}|p| + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{prop} \quad (6)$$

Pitch :

$$I_y\ddot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M_{res} + M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s}u^2\delta_s \quad (7)$$

Yaw :

$$I_z\ddot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N_{res} + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r \quad (8)$$

Di mana x, y and z merepresentasikan gerak translasi yang terdiri dari surge, sway and heave. Sedangkan p, q and r mendeskripsikan gerak rotasi yang terdiri dari heave, pitch dan yaw. Tipe dari UNUSAITs AUV menggunakan satu propeller pada tail yang menimbulkan gaya dorong yaitu x_{prop} dan momen dorong K_{prop} . Gaya dan momen luar pada AUV dipengaruhi oleh gaya hidrostatik, gaya dorong dan gaya hidrodinamika, dimana gaya hidrodinamika terdiri dari massa tambah, gaya hambat dan gaya angkat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada paper ini model nonlinear AUV dapat dilinierkan dengan matriks Jacobi, adapun bentuk umum dari model nonlinier AUV adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), t) \\ y(t) &= g(x(t), u(t), t) \end{aligned} \quad (9)$$

Sedangkan bentuk matriks Jacobi adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial f(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Bila matriks Jacobi sebagaimana diberikan pada persamaan (10) diterapkan dalam linierisasi model non-linier AUV untuk 6-DOF, maka akan diperoleh bentuk persamaan di bawah ini:

$$\frac{\partial f(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial u} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial v} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial w} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial p} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial q} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial r} \\ \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial u} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial v} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial w} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial p} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial q} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial r} \\ \frac{\partial f_3(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial u} & \frac{\partial f_3(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial v} & \frac{\partial f_3(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial w} & \frac{\partial f_3(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial p} & \frac{\partial f_3(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial q} & \frac{\partial f_3(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial r} \\ \frac{\partial f_4(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial u} & \frac{\partial f_4(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial v} & \frac{\partial f_4(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial w} & \frac{\partial f_4(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial p} & \frac{\partial f_4(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial q} & \frac{\partial f_4(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial r} \\ \frac{\partial f_5(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial u} & \frac{\partial f_5(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial v} & \frac{\partial f_5(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial w} & \frac{\partial f_5(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial p} & \frac{\partial f_5(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial q} & \frac{\partial f_5(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial r} \\ \frac{\partial f_6(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial u} & \frac{\partial f_6(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial v} & \frac{\partial f_6(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial w} & \frac{\partial f_6(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial p} & \frac{\partial f_6(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial q} & \frac{\partial f_6(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Persamaan 3 – 8 dapat diubah dalam bentuk $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6$ sebagai berikut:

$$f_1 = \frac{X_{res} + X_{|u|u}|u| + X_{wq}wq + X_{qq}qq + X_{vr}vr + X_{rr}rr + X_{prop} - m[-vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + pqy_G + prz_G]}{m - X_{\dot{u}}} \quad (12)$$

$$f_2 = \frac{Y_{res} + Y_{|v|v|v|} + Y_{r|r|r|} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{ur}ur + Y_{wp}wp + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{uu}\delta_r u^2 \delta_r - m[-wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + qr z_G + pq x_G]}{m - Y_{\dot{v}}} \quad (13)$$

$$f_3 = \frac{Z_{res} + Z_{|w|w|w|} + Z_{q|q|q|} + Z_{\dot{q}}\dot{q} + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{uu}\delta_s u^2 \delta_s - m[-uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + rp x_G + rq y_G]}{m - Z_{\dot{w}}} \quad (14)$$

$$f_4 = \frac{K_{res} + K_{p|p|p|} + K_{prop} - \left((I_z - I_y)qr + m \left[\frac{y_G(-uq + vp) -}{z_G(-wp + ur)} \right] \right)}{I_x - K_{\dot{p}}} \quad (15)$$

$$f_5 = \frac{M_{res} + M_{w|w|w|} + M_{q|q|q|} + M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu}\delta_s u^2 \delta_s - ((I_x - I_z)rp + m[z_G(-vr + wq) - x_G(-uq + vp)])}{I_y - M_{\dot{q}}} \quad (16)$$

$$f_6 = \frac{N_{res} + N_{v|v|v|} + N_{r|r|r|} + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{ur}ur + N_{wp}wp + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{uu}\delta_r u^2 \delta_r - ((I_y - I_z)pq + m[x_G(-wp + ur) - y_G(-vr + wq)])}{I_z - N_{\dot{r}}} \quad (17)$$

Model linier didapatkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A x(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (18)$$

dengan

$$A = J_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{mz_G}{m - X_{\dot{u}}} & \frac{-my_G}{m - X_{\dot{u}}} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{mz_G}{m - Y_{\dot{v}}} & 0 & \frac{(mx_G - Y_{\dot{r}})}{m - Y_{\dot{v}}} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{my_G}{m - Z_{\dot{w}}} & -\frac{(mx_G + Z_{\dot{q}})}{m - Z_{\dot{w}}} & 0 \\ 0 & -\frac{mz_G}{I_x - K_{\dot{p}}} & \frac{my_G}{I_x - K_{\dot{p}}} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{mz_G}{I_y - M_{\dot{q}}} & 0 & -\frac{(mx_G + M_{\dot{w}})}{I_y - M_{\dot{q}}} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{my_G}{I_z - N_{\dot{r}}} & \frac{(mx_G - N_{\dot{v}})}{I_z - N_{\dot{r}}} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & e_1 & g_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 & e_2 & g_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 & e_3 & g_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 & e_4 & g_4 \\ a_5 & b_5 & c_5 & d_5 & e_5 & g_5 \\ a_6 & b_6 & c_6 & d_6 & e_6 & g_6 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$B = J_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{mz_G}{m - X_{\dot{u}}} & \frac{-my_G}{m - X_{\dot{u}}} \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{mz_G}{m - Y_{\dot{v}}} & 0 & \frac{(mx_G - Y_{\dot{r}})}{m - Y_{\dot{v}}} \\ 0 & 0 & 1 & \frac{my_G}{m - Z_{\dot{w}}} & -\frac{(mx_G + Z_{\dot{q}})}{m - Z_{\dot{w}}} & 0 \\ 0 & -\frac{mz_G}{I_x - K_{\dot{p}}} & \frac{my_G}{I_x - K_{\dot{p}}} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{mz_G}{I_y - M_{\dot{q}}} & 0 & -\frac{(mx_G + M_{\dot{w}})}{I_y - M_{\dot{q}}} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{my_G}{I_z - N_{\dot{r}}} & \frac{(mx_G - N_{\dot{v}})}{I_z - N_{\dot{r}}} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 & D_1 & E_1 & G_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 & D_2 & E_2 & G_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 & D_3 & E_3 & G_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 & D_4 & E_4 & G_4 \\ A_5 & B_5 & C_5 & D_5 & E_5 & G_5 \\ A_6 & B_6 & C_6 & D_6 & E_6 & G_6 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ dan } D = 0 \quad (21)$$

4. KETERKONTROLAN DAN KETERAMATAN

Sistem dikatakan terkontrol jika rank matriks keterkontrolan sama dengan dimensi dari sistem (Subiono, 2010). Matriks keterkontrolan dibentuk dari matriks A dan matriks B. di mana matriks keterkontrolan adalah sebagai berikut :

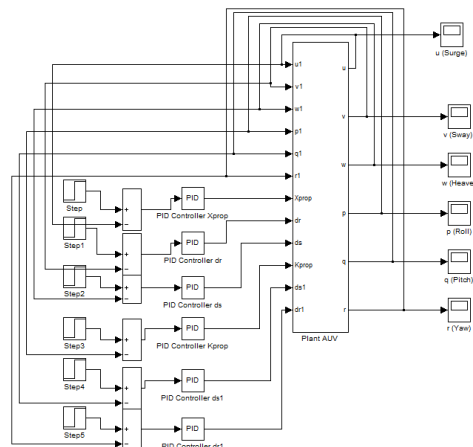
$$\text{Controlable} = (B|AB|A^2B|\dots|A^{n-1}B) = 6. \text{ Sehingga sistem terkontrol karena memiliki rank} = 6$$

Sistem dikatakan teramati jika rank keteramatan sama dengan dimensi dari sistem (Subiono, 2010). Matriks keteramatan dibentuk dari matriks A dan matriks C. di mana matriks keteramatan adalah sebagai berikut :

$$Observable = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{(n-1)} \end{pmatrix} = 6. \text{ Sehingga sistem teramati karena memiliki rank} = 6$$

5. PERANCANGAN SISTEM KENDALI PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIF (PID)

Setelah didapatkan uji karakteristik dari model linier yang terkontrol dan teramati, selanjutnya diterapkan sistem kendali PID untuk mengetahui kestabilan dari sistem AUV. Setelah dibentuk blok diagram sistem AUV, selanjutnya dibentuk sistem kendali PID dengan sistem AUV pada Gambar 3. Metode yang digunakan untuk penentuan nilai *proportional*, *integral* dan *derivative* adalah metode *trial and error*, dimana nilai K_p , K_i dan K_d terdapat pada Tabel 3.

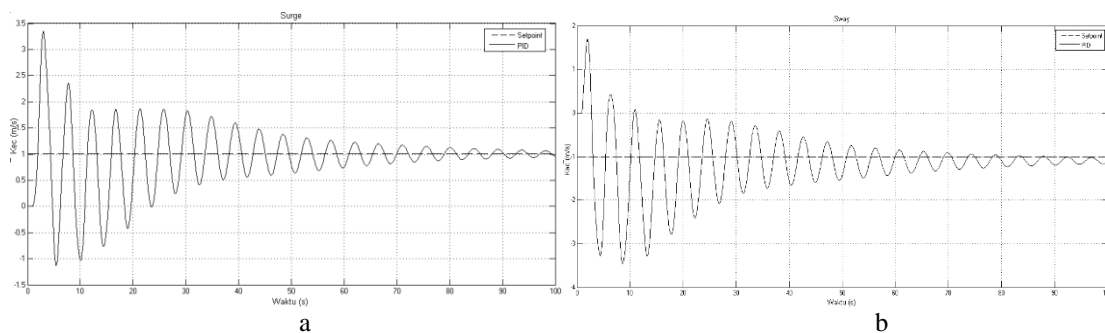


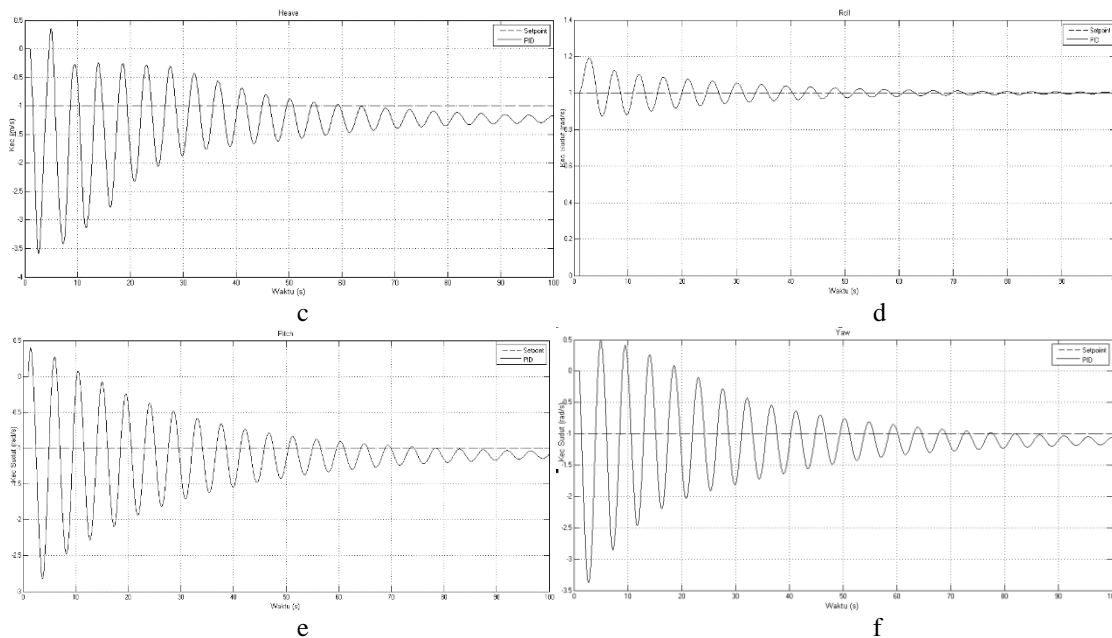
Gambar 3. Blok diagram AUV dengan sistem kendali PID

Tabel 3. Nilai *proportional*, *integral* dan *derivative* dari kendali PID

PID default			
	Proportional	Integral	Derivatif
Surge	10	1.5	2
Sway	1	10	2
Heave	3	1.5	2
Roll	2	1	0.01
Pitch	2	1	0.01
Yaw	2	1	0.01

Berikutnya setelah disimulasikan menggunakan software simulink Matlab, hasil simulasi sistem kendali PD dan kendali PID yang tampak pada Gambar 4.





Gambar 4. a) Respon surge, b) respon sway, c) respon heave, d) respon roll, e) respon pitch dan f) respon yaw dengan sistem kendali PID.

Pada Gambar 4 merupakan hasil simulasi AUV dengan sistem kendali PID dengan nilai *proportional*, *Integral* dan *Derivative* pada Tabel 5. Hasil respon menunjukkan bahwa error dari 6-DOF memiliki error antara 0.4% - 17.3 % dengan *settling time* rata-rata 70 sekon yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Error dan Settling time dari hasil respon dengan kendali PID

	Error	Settling Time
Surge	4.36 %	80 s
Sway	13.2 %	80 s
Heave	17.3 %	80 s
Roll	0.4 %	40 s
Pitch	8.9 %	70 s
Yaw	5.8 %	70 s

6. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dapat disimpulkan:

- Model nonlinier 6-DOF AUV dapat dilinierkan sehingga didapatkan model linier. Model linier tersebut sudah terkontrol dan teramati.
- Pengembangan sistem kendali gerak dengan metode PID menghasilkan error 0.4% - 17.3% dengan settling time yang cukup lama dengan rata-rata 70 sekon.

7. DAFTAR PUSTAKA

- Fossen, T. I. 2005, "A Nonlinear Unified State-space Model for Ship Maneuvering and Control in A Seaway". *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 5, pp. 2717-2746, Aug
- Herlambang, T., Djatmiko E.B and Nurhadi H., 2015a "Navigation and Guidance Control System of AUV with Trajectory Estimation of Linear Modelling", *Proc. of International Conference on Advance Mechatronics, Intelligent Manufactre, and Industrial Automation*, IEEE , ICAMIMIA 2015, Surabaya, Indonesia, pp. 184-187, Oct 15 – 17
- Herlambang, T., Djatmiko E.B and Nurhadi H., 2015b, "Ensemble Kalman Filter with a Square Root Scheme (EnKF-SR) for Trajectory Estimation of AUV SEGOROGENI ITS", *International Review of Mechanical Engineering IREME Journal*, Vol. 9, No. 6. Pp. 553-560, ISSN 1970 – 8734. Nov
- Subiono. 2010. *Matematika Sistem*. Jurusan Matematika FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- Yang, C. 2007. *Modular Modelling and Control for Autonomous Vehicle (AUV)*. Department of Mechanical Engineering National University of Singapore